

# Avaliação da influência do vento na circulação de uma lagoa de estabilização

## Evaluation of the wind influence in the circulation of a stabilization pond

---

### Edson Geraldo Casarotti

Mestre em Engenharia Civil. Engenheiro na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) – São Paulo (SP), Brasil.

### Tsunao Matsumoto

Doutor em Engenharia Civil. Professor Adjunto na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Ilha Solteira (SP), Brasil.

### Liliane Lazzari Albertin

Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Professor-assistente Doutor no Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP – Ilha Solteira (SP), Brasil.

---

## Resumo

Este artigo avaliou a influência do vento em diferentes profundidades na circulação de massa líquida da lagoa facultativa da estação de tratamento de esgotos do município de Álvares Florence, em São Paulo, Brasil, por meio de flutuadores com diferentes dimensões (15, 25 e 35 cm de comprimento). Por meio de um método simples, prático e de baixo custo, foi possível verificar o sentido de circulação da lagoa, o qual, por sua vez, está relacionado com a direção dos ventos.

**Palavras-chave:** lagoa de estabilização; circulação hidrodinâmica; tratamento de esgoto.

## Abstract

This article evaluated the wind influence at different depths in the stabilization pond circulation for wastewater treatment plant in the city of Álvares Florence, São Paulo, Brazil, using floats of different sizes (15, 25, and 35 cm in length). Through a simple, practical, and inexpensive method, it was possible to verify the direction of the lagoon circulation, which in turn is related to wind direction.

**Keywords:** stabilization pond; hydrodynamic; wastewater treatment.

## Introdução

As lagoas de estabilização dos esgotos, devido ao fato de apresentarem baixos custos de implantação e operação, têm tornado-se populares nos países em desenvolvimento. As mesmas tratam os efluentes com alta eficiência, garantindo grau superior de desinfecção e baixo teor em matéria orgânica, quando bem projetadas e operadas. Para tanto, suas características hidrodinâmicas são muito importantes no processo de depuração que ocorre em tais unidades de tratamento (KELLNER & PIRES, 1998). Essas características podem ser afetadas por diversos fatores.

Pessôa e Jordão (1995) comentaram que a ocorrência de curtos-circuitos e o processo de dispersão influenciam diretamente na eficiência do sistema. Fatores externos não controláveis, como o vento, a estratificação térmica e a radiação solar, podem também intervir no processo.

De acordo com Von Sperling (2002), a radiação solar, a temperatura e o vento influenciam de uma maneira ou outra os processos que ocorrem nas lagoas. A radiação solar causa um efeito na velocidade de fotossíntese, que é influenciada pela temperatura. Entretanto, a temperatura altera a taxa de decomposição bacteriana, a solubilidade, a transferência de gases e as condições de mistura (inversão térmica). Por outro lado, o vento exerce influência nas condições de mistura e na reaeração atmosférica (VON SPERLING, 2002).

O vento e a temperatura são importantes fatores que propiciam a mistura. Com uma junção eficiente, haverá: minimização de curtos-circuitos e zonas mortas; melhoria na distribuição vertical de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), algas e oxigênio; favorecimento do transporte das algas não motoras para a zona fótica e do oxigênio produzido pela fotossíntese na zona fótica para as camadas mais profundas (SILVA & MARA, 1979).

Para determinar o tempo de residência e o volume útil, verificar a existência de curtos-circuitos e zonas mortas e avaliar perfis de velocidade e padrões de circulação, pesquisadores utilizaram traçadores (MORENO, 1990; KELLNER; MOREIRA; PIRES, 2009; SHORT; CROMAR; FALLOWFIELD, 2010) e flutuadores (MENESES, 2006).

Outros pesquisadores como Badrot-Nico, Guinot e Brissaud (2009) e Aldana *et al.* (2009) têm avaliado a influência do vento no comportamento hidrodinâmico das lagoas de estabilização, por meio de uma simulação em modelos computacionais ajustados aos dados físicos obtidos naqueles reduzidos de lagoas e também em escala real.

A necessidade de conhecer o comportamento hidrodinâmico torna-se cada vez mais importante para que possam ser concebidos projetos mais eficientes com maior aproveitamento da área útil das lagoas, favorecendo a mistura e a atividade biológica.

Neste artigo foi avaliado o padrão de circulação em várias profundidades em uma lagoa de estabilização por meio do uso de flutuadores. Foi comprovada a influência dos ventos na movimentação da massa líquida da lagoa.

## Metodologia

A pesquisa foi realizada na estação de tratamento de esgotos (ETE) de propriedade da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) do município de Álvares Florence, localizado a Noroeste do estado de São Paulo. O município situa-se em uma altitude média de 447 m e tem uma população estimada de 2.652 habitantes, de acordo com o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A cidade de Álvares Florence possui clima quente e úmido com registro de temperatura média entre 22 e 25°C e precipitação média de 1.350 mm.ano<sup>-1</sup>.

A ETE está em operação desde 1992 e foi concebida para tratar 100% dos esgotos coletados no município, sendo composta por duas lagoas de estabilização tipo facultativa, primária operadas em



**Figura 1** – Vista aérea das lagoas facultativas da estação de tratamento de esgoto Álvares Florence.

paralelo (uma com volume de 1.570 m<sup>3</sup> e a outra, 1.523 m<sup>3</sup>). A estimativa da vazão afluyente total é de 372 m<sup>3</sup>/dia com tempo de detenção hidráulica estimada em 8,5 dias e profundidade operacional em torno de 1,10 m.

A ETE é alimentada com esgoto tipicamente doméstico e por fluxo intermitente devido à existência de uma estação elevatória de esgotos.

A Figura 1 apresenta uma fotografia das lagoas de estabilização. O fluxo segue da direita à esquerda. Os experimentos foram realizados na Lagoa Facultativa 2, localizada na parte inferior da Figura 1. Vale atentar-se ao fato de que na margem esquerda da segunda lagoa existe um talude que, conforme será mostrado, influencia na circulação do líquido na lagoa devido ao vento.

Para auxiliar as anotações das posições dos flutuadores durante os experimentos, a lagoa foi dividida e demarcada nos quatro lados com piquetes, conforme mostra a Figura 2. No sentido longitudinal a divisão foi realizada em intervalos de 10 m, com exceção dos extremos que ficaram com 6 e 8 m próximos à entrada e saída, respectivamente, perfazendo um comprimento total de 74 m. No sentido transversal, a lagoa foi dividida nas seguintes distâncias: entre a borda da lagoa e a entrada 1, dois espaços de 4,2 m; entre a borda da lagoa e a entrada 3, dois de 4,2 m e mais quatro de 4 m entre as entradas 1 e 3, perfazendo uma largura total de 32,8 m.

Foram confeccionados nove flutuadores com tubo PVC para esgotos e diâmetro de 50 mm. Os tubos foram fechados e vedados. Foi utilizada pedra (brita número 1) como lastro para manter parte do corpo de cada flutuador submerso.

Os flutuadores foram confeccionados em três diferentes cores e dimensões, tendo na parte submersa duas placas em formato “X” de 15 por 9 cm formando atuadores, conforme segue discriminado e representado nas Figuras 3 e 4. O esquema, portanto, é o seguinte:

- três flutuadores com 15 cm de comprimento, ficando 11 cm submersos e 4 cm emersos, pintados na cor amarela, denominados  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ;
- três flutuadores com 25 cm de comprimento, ficando 21 cm submersos e 4 cm emersos, pintados na cor vermelha, denominados  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ ;
- três flutuadores com 35 cm de comprimento, ficando 31 cm submersos e 4 cm emersos, pintados na cor azul, denominados  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ .

Os flutuadores foram confeccionados em comprimentos diferentes para que fosse possível verificar o padrão de circulação da lagoa em diferentes profundidades.

Os flutuadores amarelos ( $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ) representam a camada superior da lagoa, já os vermelhos ( $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ ), a intermediária, e os azuis ( $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ ), a mais profunda.

Foram realizados cinco ensaios experimentais nos dias 11 (Ensaio 1), 17 (Ensaio 2), 19 (Ensaio 3), 23 (Ensaio 4) e 27 (Ensaio 5) de fevereiro de 2011.

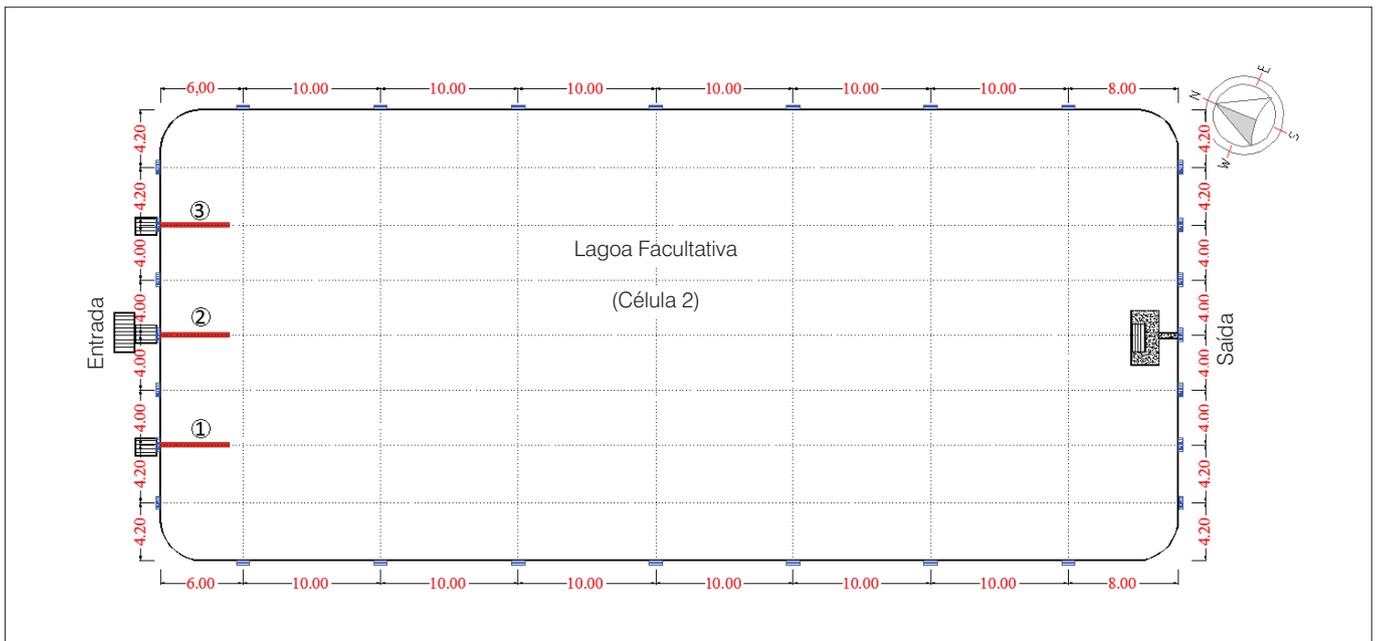


Figura 2 – Distribuição dos piquetes (em azul) na lagoa facultativa 2 da estação de tratamento de esgoto Álvares Florence.

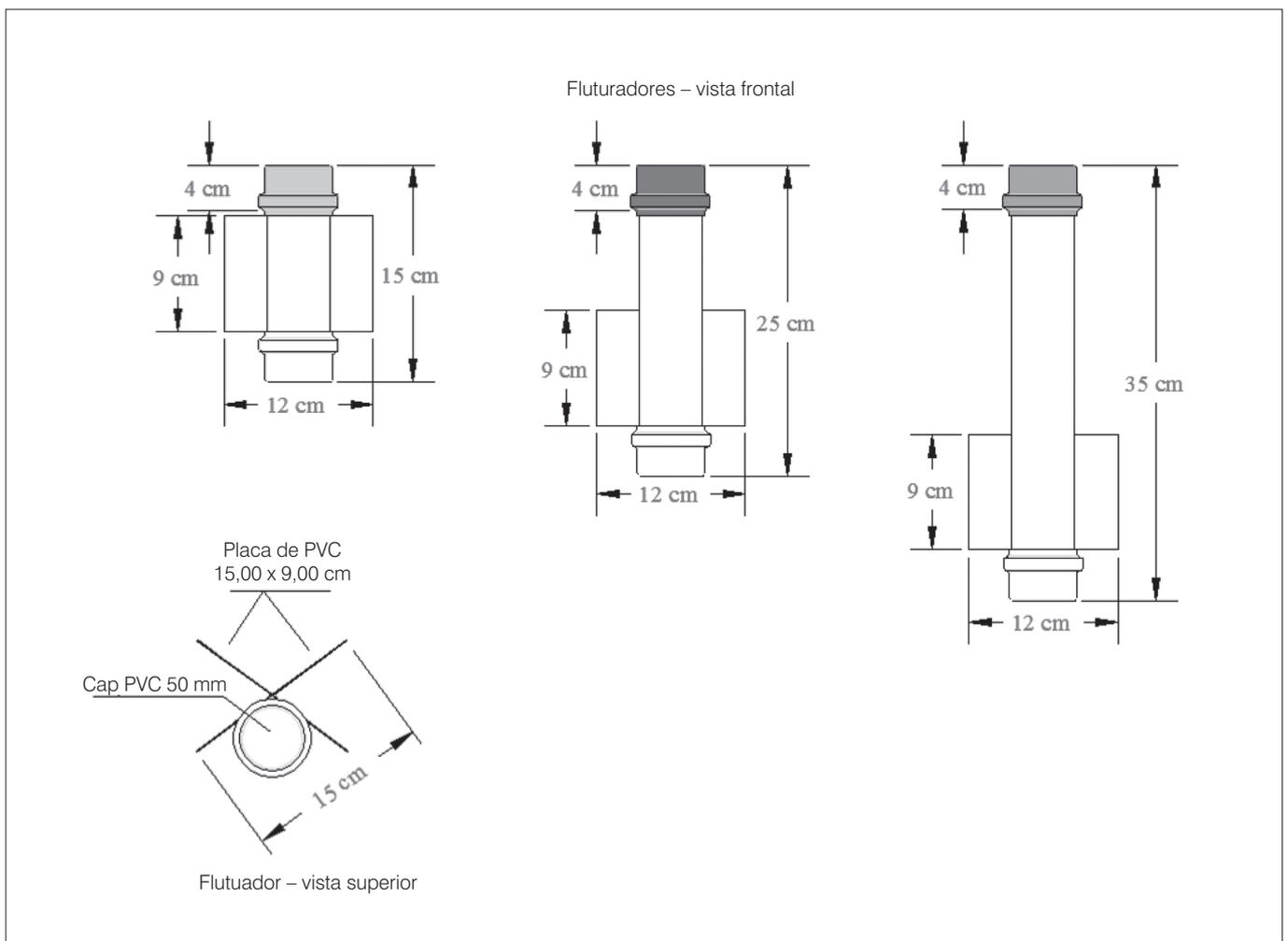
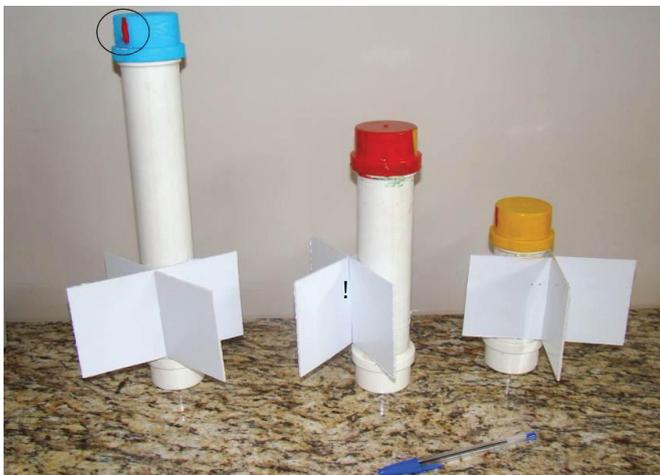


Figura 3 – Representação dos flutuadores: vistas frontal e superior.



**Figura 4** – Foto dos flutuadores. Note a marcação “|” do flutuador azul indicando que deverá ser lançado na entrada 1 da lagoa.

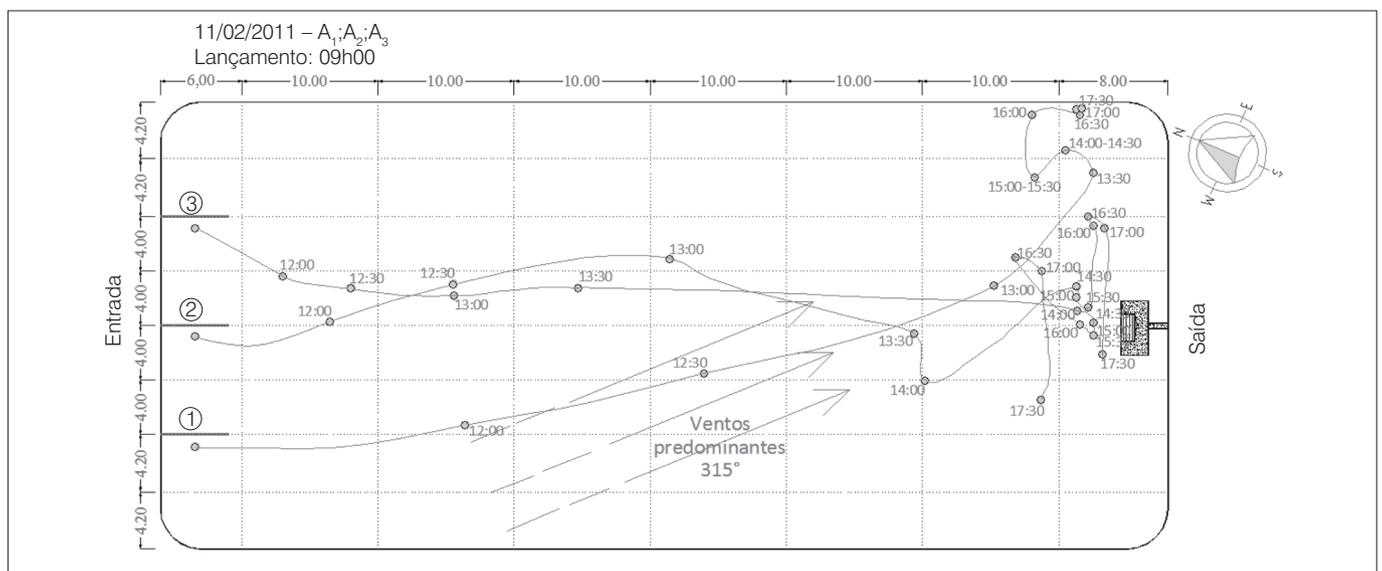
Os flutuadores  $A_1$ ,  $V_1$  e  $Z_1$  foram lançados na Entrada 1 da lagoa; os  $A_2$ ,  $V_2$  e  $Z_2$  na 2; e os  $A_3$ ,  $V_3$  e  $Z_3$ , na 3.

Em cada ensaio foram realizados três lançamentos. No primeiro, os flutuadores amarelos ( $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ) eram lançados simultaneamente. No segundo, os três vermelhos ( $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ ) eram lançados. No terceiro lançamento, era a vez dos azuis ( $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ ) serem lançados simultaneamente.

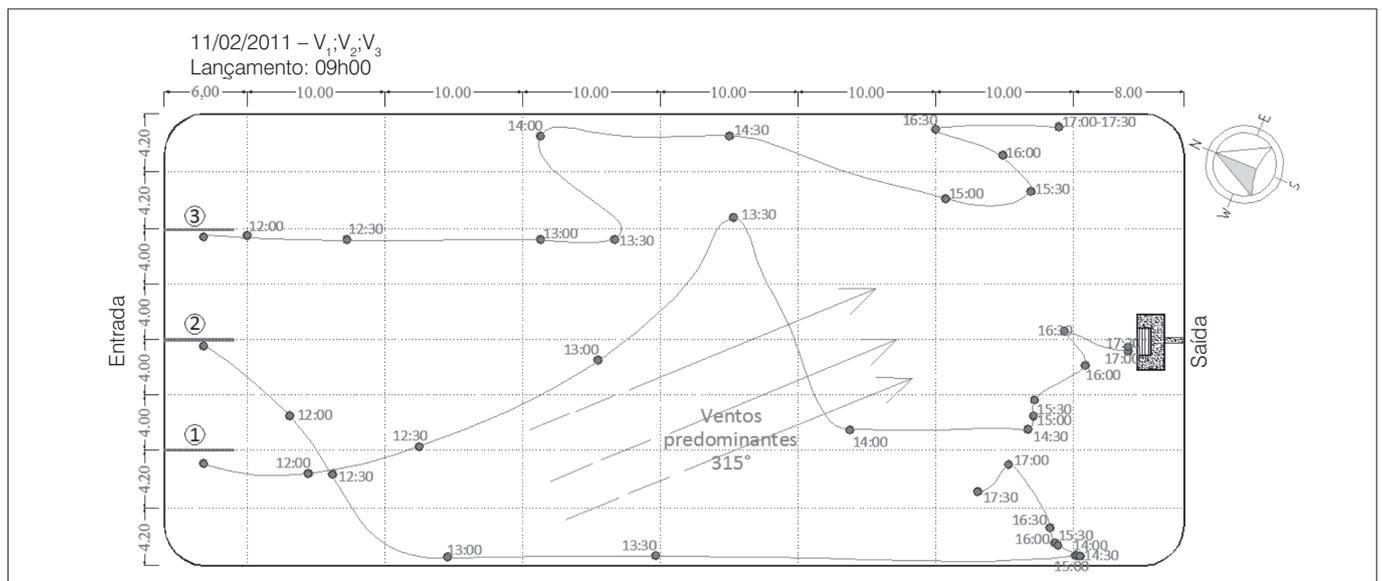
A cada 30 minutos eram realizadas medições das posições dos flutuadores na lagoa, da velocidade e da direção do vento.

## Resultados e Discussão

Nas Figuras 5, 6 e 7 é mostrado o percurso de cada flutuador na lagoa mediante exposição aos ventos, com direção predominante Noroeste-sudeste e velocidade média de 0,9 m/s, situação encontrada na realização do Ensaio 1.



**Figura 5** – Comportamento dos flutuadores  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  no Ensaio 1.



**Figura 6** – Comportamento dos flutuadores  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  no Ensaio 1.

Vale destacar que os flutuadores da Entrada 1 ( $A_1$ ,  $V_1$  e  $Z_1$ ), pelo motivo de não sofrerem influência do talude da margem esquerda, foram os primeiros a iniciarem o percurso.

$A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , por terem menor comprimento, representam a movimentação da camada superior da lagoa devido à ação do vento. Por meio da Figura 5, observa-se que tais flutuadores são direcionados pela ação dos ventos predominantes noroeste-sudeste em praticamente todo o percurso. Entre o período de 13 e 15 horas, o vento muda sua direção à norte-sul, sendo possível verificar a influência dos ventos principalmente no flutuador  $A_2$ , que mudou seu sentido de deslocamento.

O deslocamento dos flutuadores azuis, os quais representam a camada mais profunda da lagoa, é mostrado na Figura 7. Os ventos predominantes noroeste-sudeste são válidos até às 13 horas, quando passou a ter sentido norte-sul até às 15 horas e 30 minutos, momento em que voltou ao sentido noroeste-sudeste.

No caso dos flutuadores azuis, pode-se dizer que o comportamento seguiu exatamente a direção dos ventos, com exceção do flutuador  $Z_2$ , que ficou preso no lodo.

A movimentação realizada pelos flutuadores próximos à saída da lagoa indicou que a massa líquida nesta região não se encontra estagnada.

Os ventos predominantes do Ensaio 2 estavam na direção nordeste-sudoeste com velocidade média de 2,35 m/s.

O comportamento dos flutuadores  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , como mostrado na Figura 8, foi influenciado em sua totalidade pela direção do vento. Os mesmos foram conduzidos até a borda direita da lagoa e daí até o final do percurso na extremidade oposta. Esta movimentação provavelmente representa que a massa líquida da lagoa se movimenta no sentido anti-horário, o que foi confirmado pelo deslocamento dos flutuadores no início do ensaio.

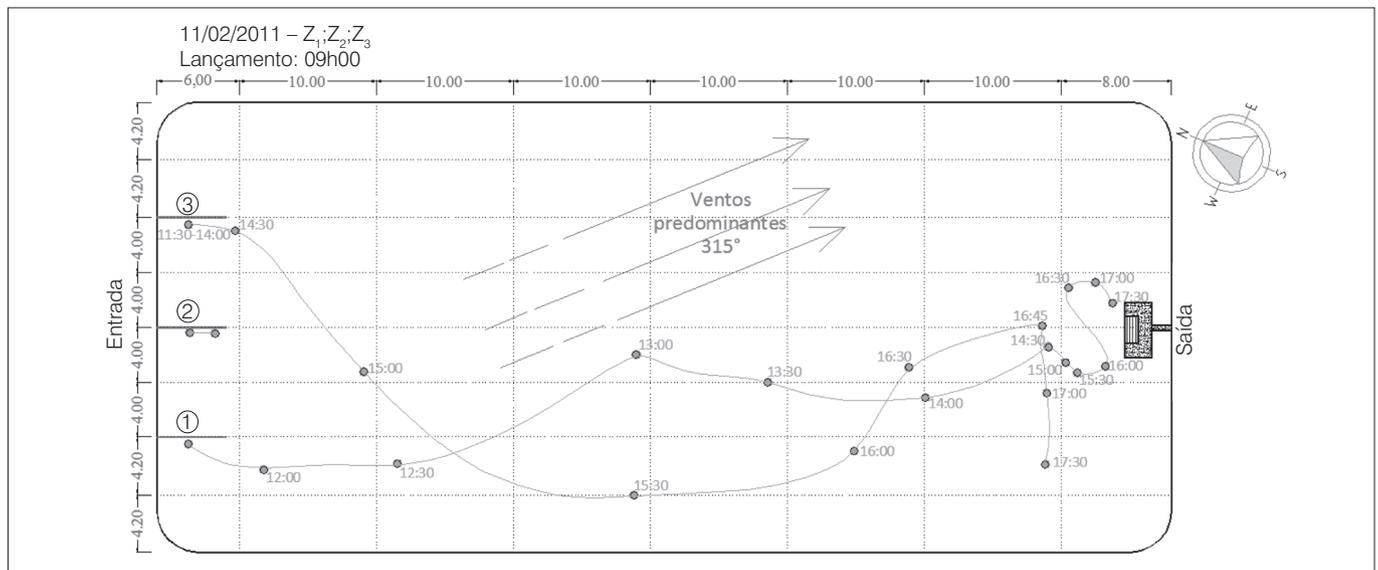


Figura 7 – Comportamento dos flutuadores  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  no Ensaio 1.

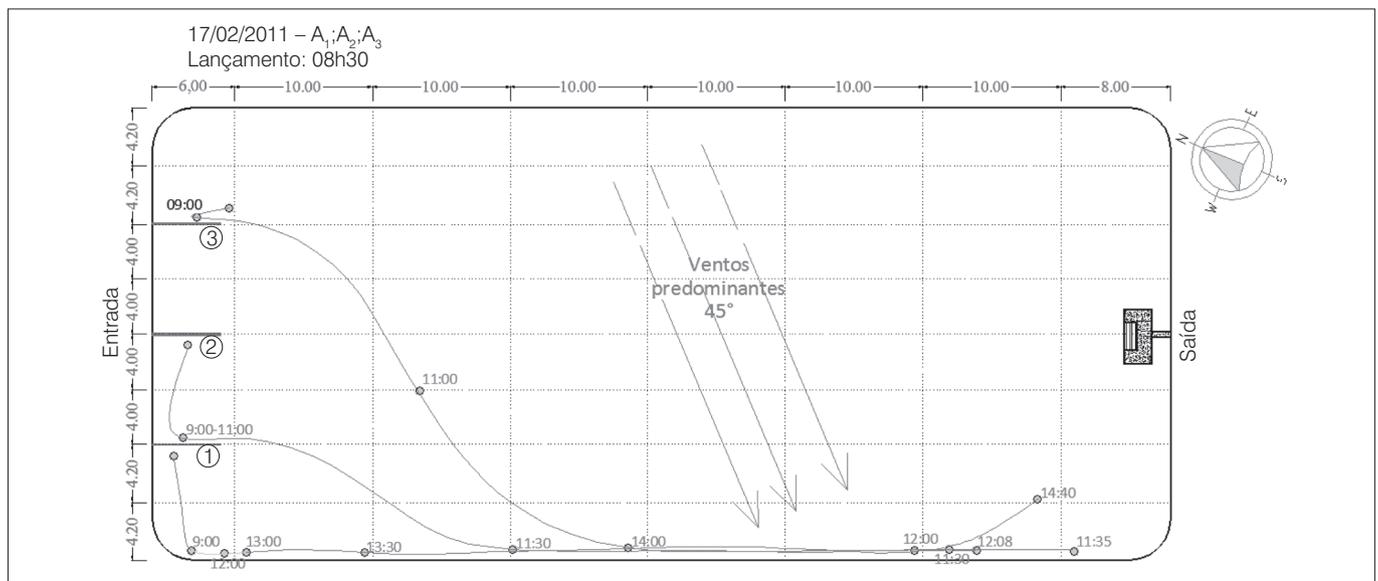


Figura 8 – Comportamento dos flutuadores  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  no Ensaio 2.

De forma análoga, os flutuadores vermelhos, representando a movimentação da camada intermediária da lagoa, tiveram o mesmo comportamento dos amarelos, com exceção do  $V_1$ , que ficou estacionado no canto da lagoa até o final do ensaio, conforme ilustrado na Figura 9.

No Ensaio 2 todos os flutuadores azuis ficaram presos no lodo existente na entrada da lagoa, conforme mostra a Figura 10.

No Ensaio 3 os ventos estavam predominantemente na direção noroeste-sudeste, com velocidade média de  $1,40 \text{ m.s}^{-1}$ .

Os flutuadores amarelos e vermelhos tiveram seu deslocamento na direção do vento, podendo ser observado nas Figuras 11 e 12. Após chegarem ao final do percurso, os flutuadores realizaram

movimentos circulares, evidenciando que a energia do vento transferida para a massa líquida da lagoa não permite que os flutuadores fiquem parados em um mesmo ponto.

Pela Figura 13 observa-se que os flutuadores azuis tiveram comportamentos diferentes dos amarelos e vermelhos. No Ensaio 3, eles foram lançados numa posição após o banco de lodo. Devido aos seus atuadores se situarem a 31 cm de profundidade, percebe-se que estes nem sempre desenvolveram movimentação condizente com a direção dos ventos predominantes.

$Z_2$  e  $Z_3$  se encaminharam para a borda esquerda da lagoa devido ao movimento da massa líquida em sua profundidade atuar de forma

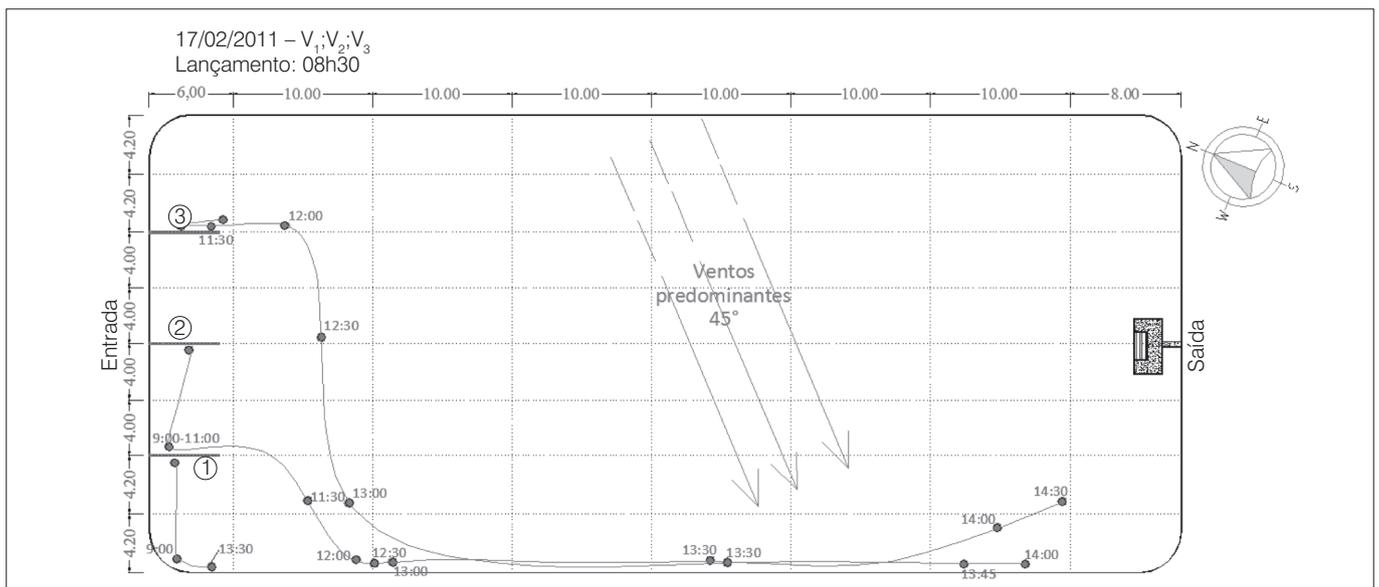


Figura 9 – Comportamento dos flutuadores  $V_1, V_2, V_3$  no Ensaio 2.

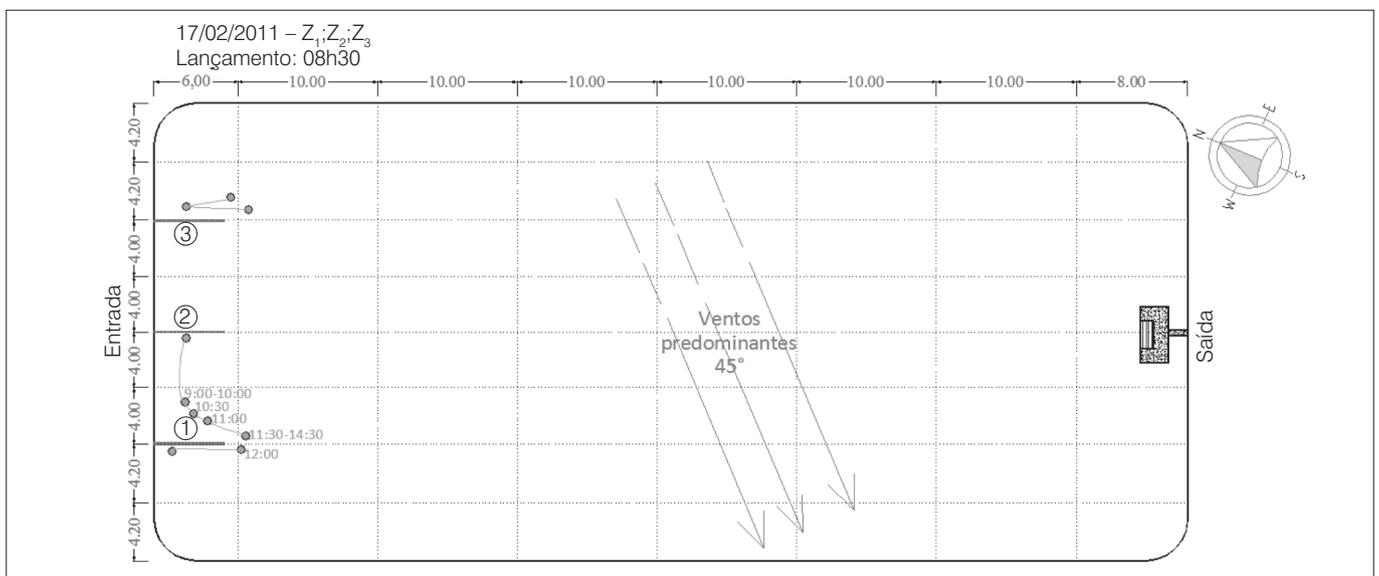


Figura 10 – Comportamento dos flutuadores  $Z_1, Z_2, Z_3$  no Ensaio 2.

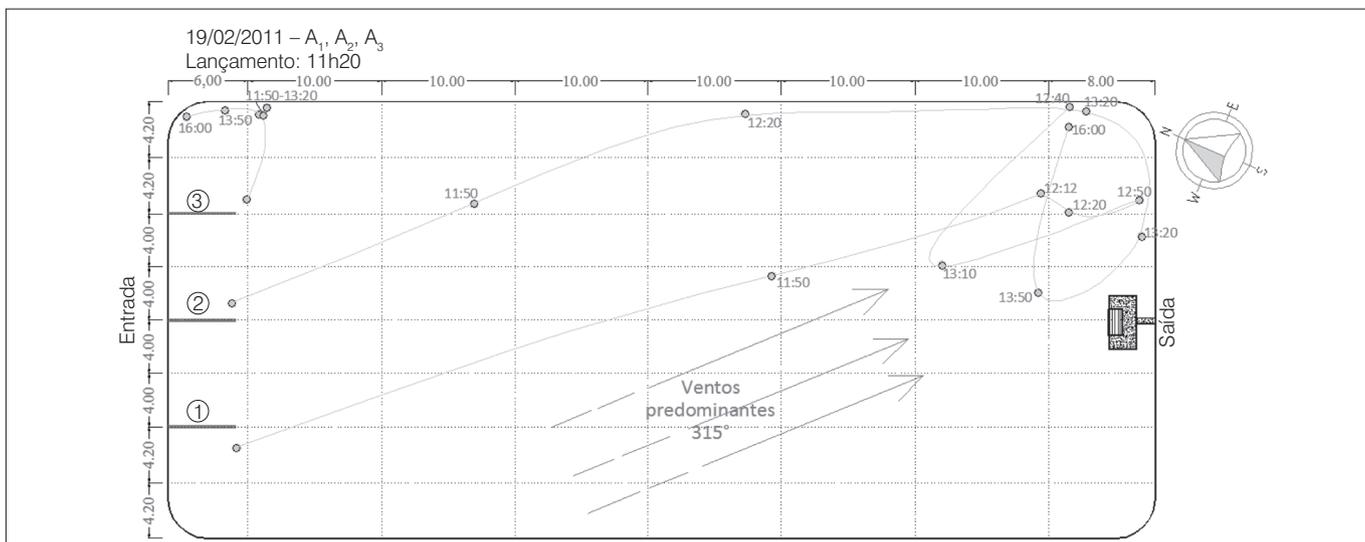


Figura 11 – Comportamento dos flutuadores A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> no Ensaio 3.

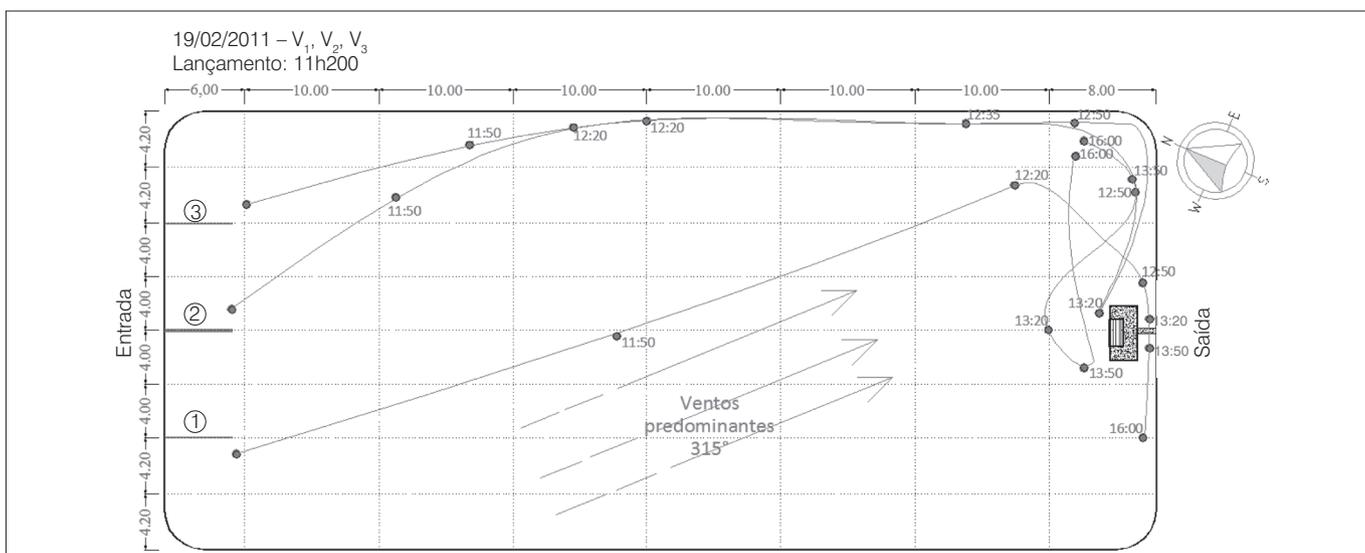


Figura 12 – Comportamento dos flutuadores V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> no Ensaio 3.

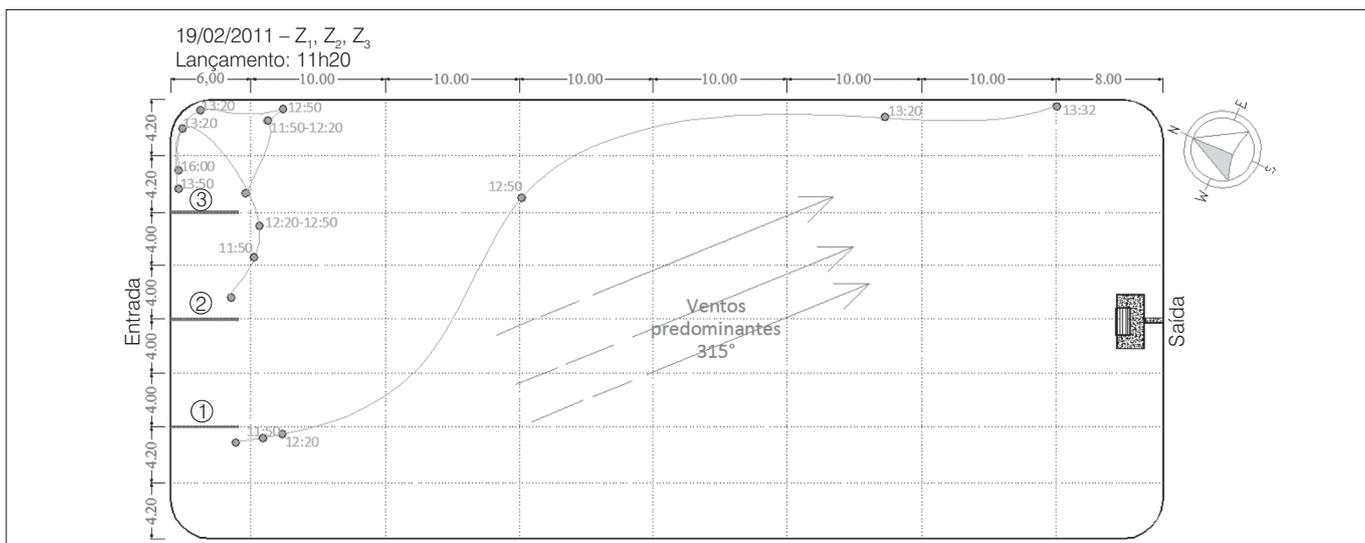


Figura 13 – Comportamento dos flutuadores Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub> no Ensaio 3.

diferente das camadas superficiais, ou seja, a força exercida nos atuadores desses flutuadores foi maior do que aquela pelo vento na parte emersa.

No Ensaio 4 houve predominância dos ventos na direção noroeste-sudeste, com velocidade média de 1,5 m.s<sup>-1</sup>.

Por meio da Figura 14, observa-se que A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> deslocaram-se aparentemente contrariando a direção dos ventos predominantes no início do percurso. Isso mostra que a região próxima à entrada 3 da lagoa desenvolve movimentos circulares, justificando o comportamento dos flutuadores A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, os quais

mostraram a tendência de direcionamento às bordas, para depois seguirem o curso até o final da lagoa.

No comportamento dos flutuadores V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>, pode-se notar, pela Figura 15, que há diferença entre o direcionamento do fluxo da lagoa a 21 cm de profundidade e a direção dos ventos. Tanto o flutuador V<sub>1</sub> como o V<sub>2</sub> tiveram a mesma mudança de direção na mesma região da lagoa e em horários distintos. É possível que tal região seja divisa de fluxo da massa líquida com aquele da superfície da lagoa, propiciado pela força dos ventos.

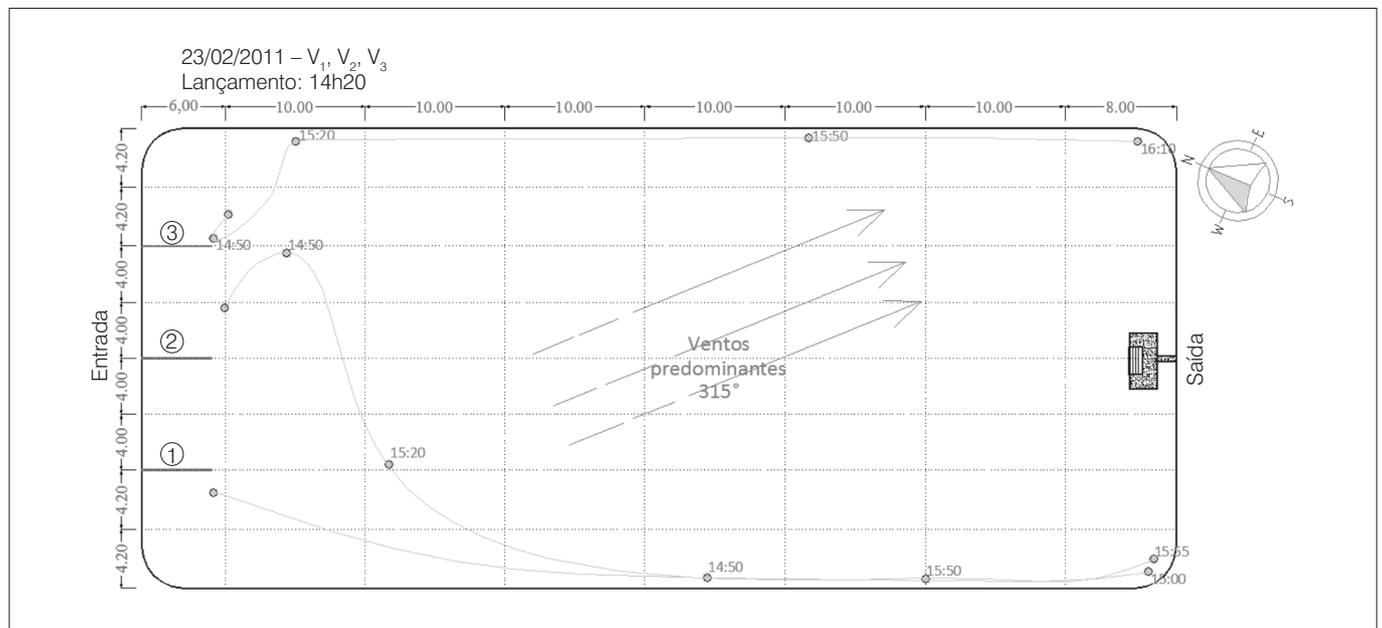


Figura 14 – Comportamento dos flutuadores A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> no Ensaio 4.

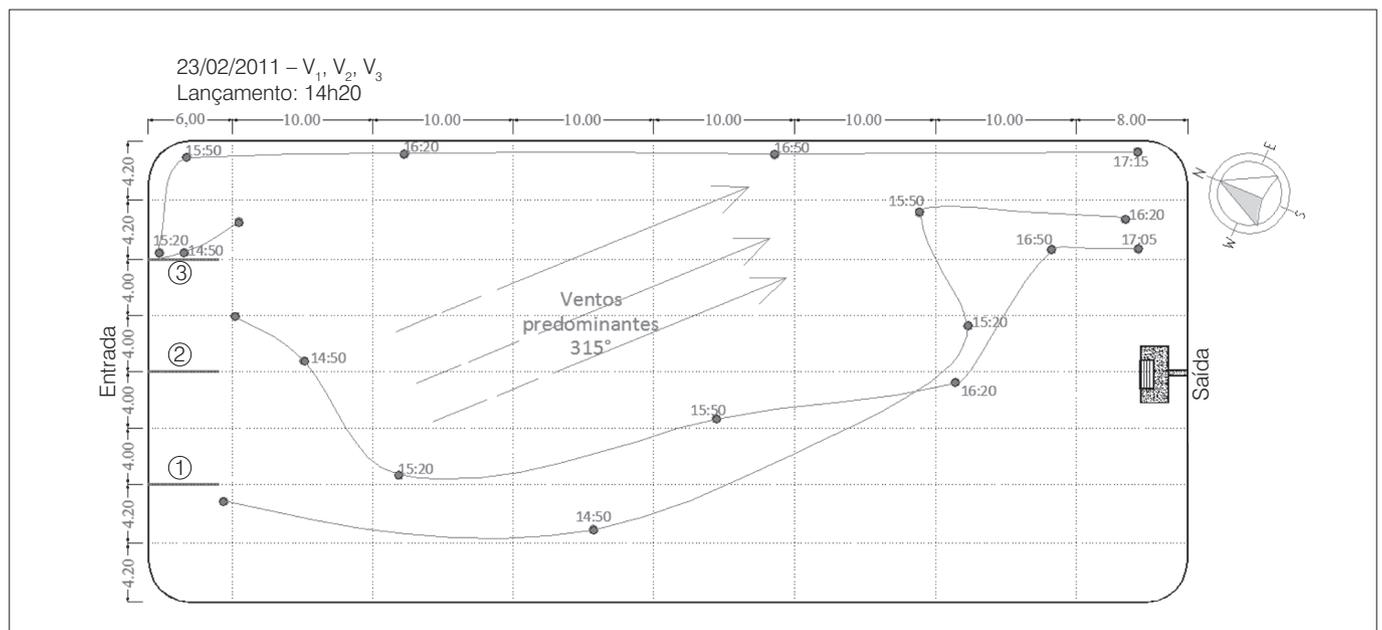


Figura 15 – Comportamento dos flutuadores V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> no Ensaio 4.

Observa-se pelas Figuras 14 e 15 uma zona de estagnação localizada no lado esquerdo da Entrada 3, provavelmente resultante do talude em corte existente nesta área.

Na Figura 16, verifica-se que às 16 horas e 20 minutos  $Z_2$  mudou sua trajetória, mesmo com velocidade média do vento nesse horário de  $3,08 \text{ m.s}^{-1}$ , a maior registrada nos ensaios e no sentido noroeste-sudeste. O flutuador  $Z_2$  é conduzido pelo fluxo da massa líquida a uma profundidade de 31 cm, diferentemente do fluxo superficial.

O comportamento de todos os flutuadores no Ensaio 4 está apresentado na Figura 17. O movimento do líquido até então não tinha ficado nítido nos ensaios anteriores. O comportamento dos flutuadores  $Z_2$ ,  $V_1$  e  $V_2$  mostrou que a aproximadamente 15 m a jusante da entrada da lagoa existe uma divisão dos fluxos a 30 cm de profundidade e a zona superficial, provocada pela ação do vento sobre a massa líquida da lagoa.

O Ensaio 5 foi realizado com ventos oscilando entre as direções norte-sul e nor-nordeste – su-sudoeste. A velocidade média

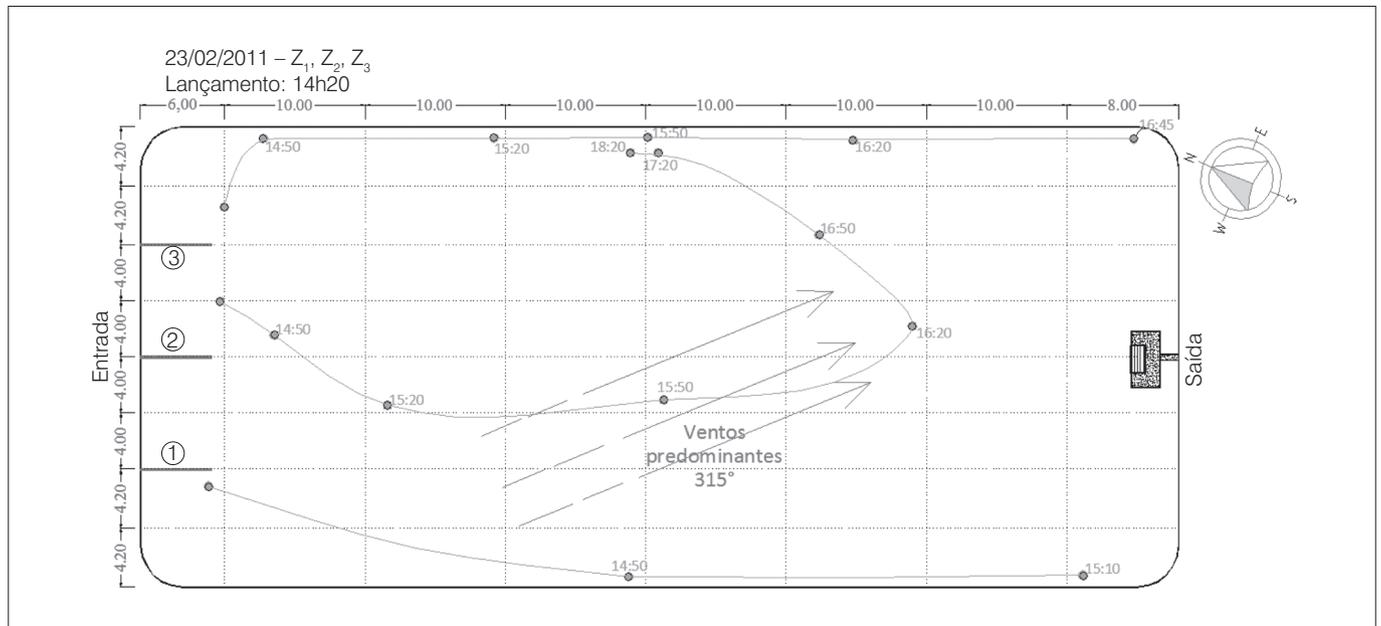


Figura 16 – Comportamento dos flutuadores  $Z_1, Z_2, Z_3$  no Ensaio 4.

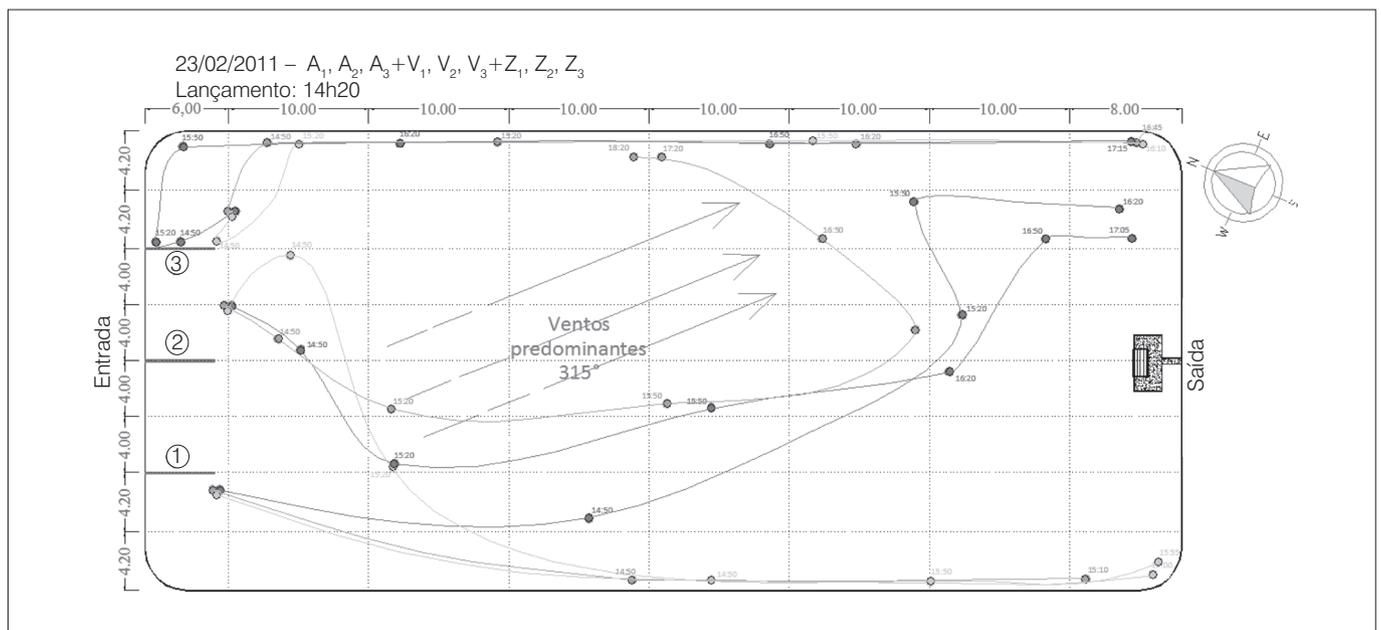


Figura 17 – Comportamento dos flutuadores no Ensaio 4.

dos ventos foi de  $0,97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Os resultados estão apresentados nas Figuras 18, 19 e 20.

Com exceção do flutuador  $V_2$ , que retornou ao ponto de lançamento e lá permaneceu, os amarelos, os demais vermelhos e os azuis acompanharam o sentido dos ventos até a borda direita da lagoa e até o final do percurso.

O comportamento dos flutuadores superficiais (A), como os mais profundos (V e Z), mostra que a circulação da massa líquida da lagoa

se encontrava em sentido anti-horário e na direção dos ventos predominantes em todas as camadas.

## Conclusões

A realização dos experimentos com os flutuadores confeccionados em tubos de PVC e atuadores na extremidade inferior alcançou um resultado satisfatório diante das discussões comentadas.

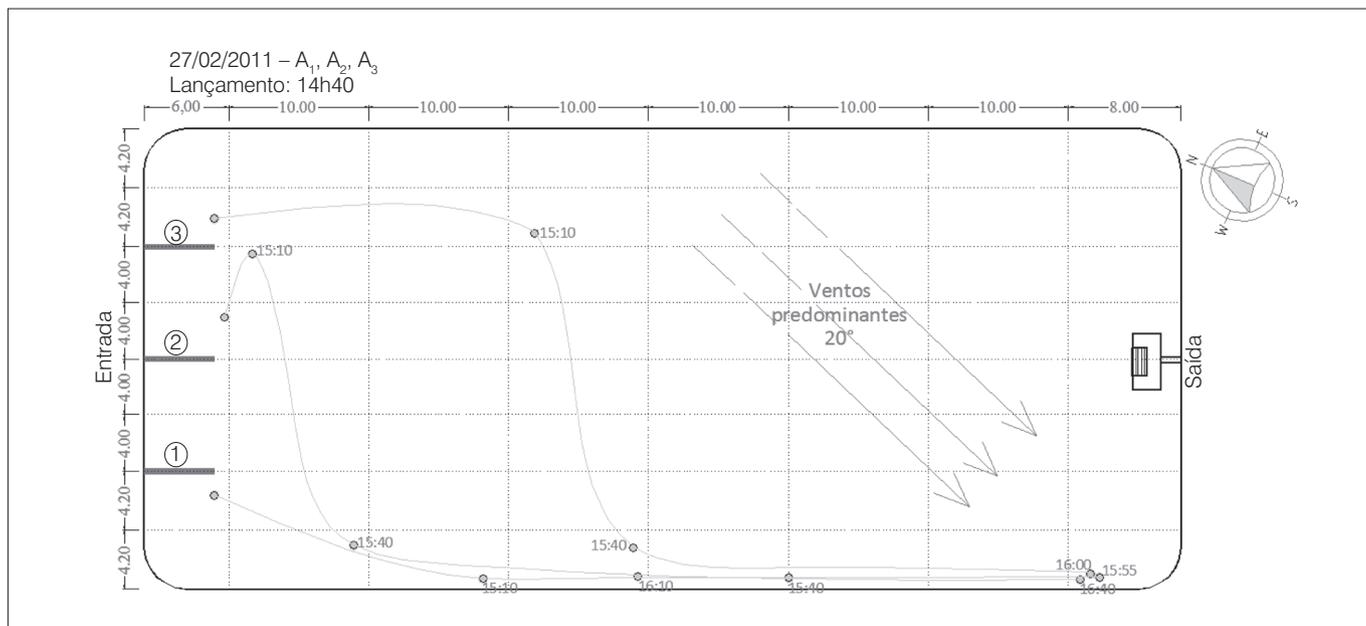


Figura 18 – Comportamento dos flutuadores A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> no Ensaio 5.

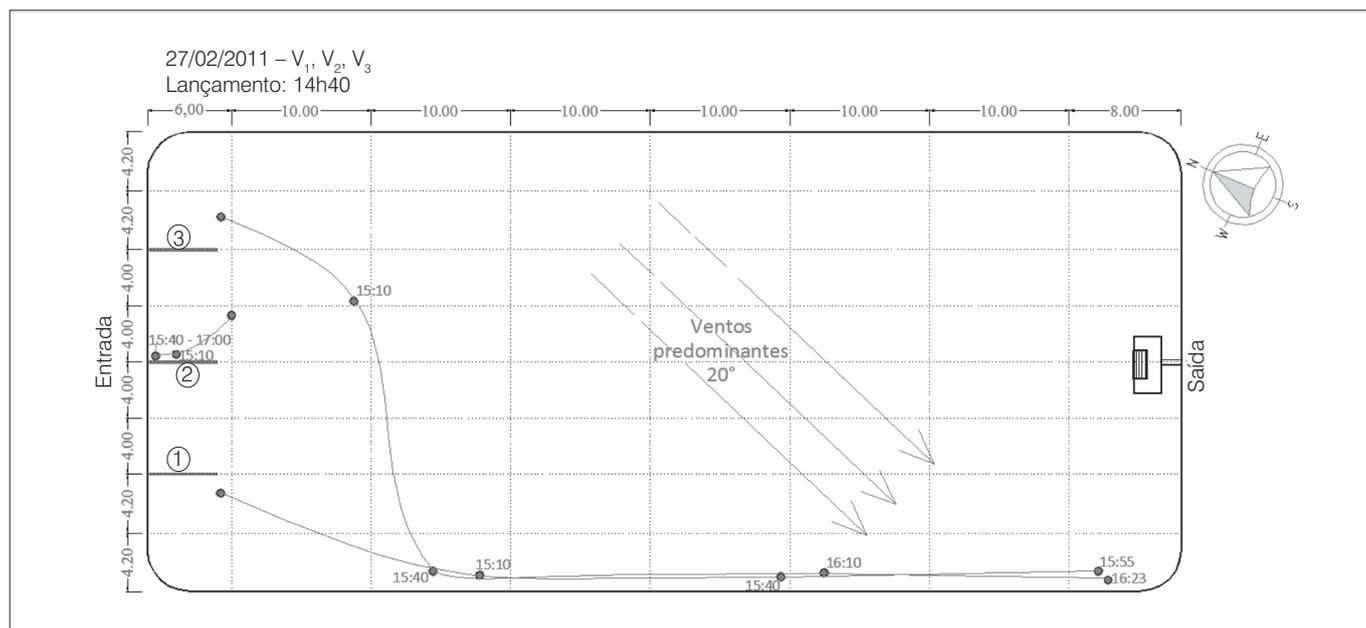
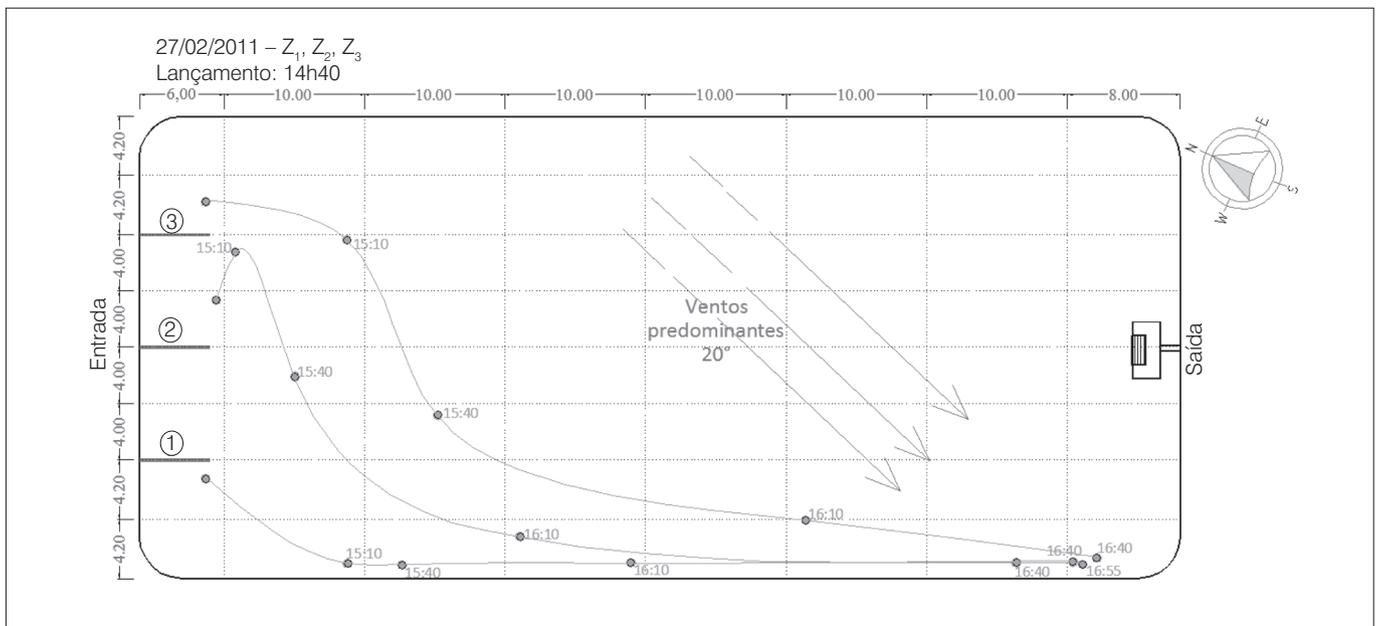


Figura 19 – Comportamento dos flutuadores V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> no Ensaio 5.



**Figura 20** – Comportamento dos flutuadores  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  no Ensaio 5.

Os ensaios com flutuadores de diversos tamanhos evidenciaram a diferença no deslocamento de cada um deles em relação à direção do vento e ao fluxo da massa líquida nas regiões superficial, intermediária e inferior da lagoa.

Os resultados obtidos mostraram a influência da borda quanto ao direcionamento do vento e à sua transmissão de energia à superfície líquida.

Pelos resultados obtidos, verificou-se a influência dos ventos na movimentação da massa líquida da lagoa. O sentido da circulação do líquido se relaciona com a direção dos ventos predominantes. Desse modo, foi possível identificar zonas de estagnação e de curto-circuito e verificar a tendência de escoamento na lagoa como de mistura completa.

Se realizado em conjunto com levantamento batimétrico, o ensaio com os flutuadores pode ser uma alternativa para estimar com maior precisão o tempo de detenção hidráulica ao longo da operação da lagoa.

O uso de flutuadores, dependendo de seu comprimento, pode permitir identificar as várias zonas de mistura ao longo da profundidade da lagoa e a possibilidade de correlacioná-la com a eficiência do tratamento.

Finalmente, este é um método simples, barato e eficaz para verificar a circulação da lagoa, que pode ser utilizado principalmente por países em desenvolvimento.

## Referências

- ALDANA, G.J.; LLOYD, B.J.; GUGANESHARAJSH, K.; BRANCHO, N. (2009) The impact of wind on Waste stabilisation Ponds performance. In: *8<sup>TH</sup> IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS (IWA Pond's 2009)*, Belo Horizonte, MG, Brazil.
- BADROT-NICO, F.; GUINOT, V.; BRISSAUD, F. (2009) Taking wind into account in the design of waste stabilisation ponds. In: *8<sup>TH</sup> IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS (IWA Pond's 2009)*, Belo Horizonte, MG, Brazil.
- PESSÔA, C.A. & JORDÃO, E.P. (1995) *Tratamento de esgotos domésticos: concepções clássicas de tratamento de esgoto*. 3 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 720 p.
- KELLNER, E. & PIRES, E.C. (1988) *Lagoas de estabilização: projeto e operação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 244 p.
- KELLNER, E.; MOREIRA, J.F.V.; PIRES, E.C. (2009). Influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoa de estabilização: determinação experimental e teórica. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 129-138.
- MENESES, C.G.R. (2006). *Evolução da biodegradabilidade da matéria orgânica em um sistema de lagoas de estabilização*. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MORENO, M.D. (1990). A tracer study of the hydraulics of facultative stabilization ponds. *Water Research*, v. 24, n. 8, p. 1025-1030.

SHORT, M.D.; CROMAR N.J.; FALLOWFIELD, H.J. (2010). Hydrodynamic performance of pilot-scale duckweed, algal-based, rock filter and attached-growth media reactors used for waste stabilization pond research. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 12, p. 1700-1708.

SILVA, S.A. & MARA, D.D. (1979) *Tratamentos biológicos de águas residuárias*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

VON SPERLING, M. (2002) *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lagoas de estabilização*. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. 196 p.